

Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Лаборатория экспериментальных методов физики

ОТЧЕТ

«Изучение лавинного фотодиода»

Выполнили:
Белавин В.С.
Кальницкий Л.Ю.

Руководитель:
Хохлов Ю.А.
Шумаков А.А.

2014 год

1. Введение

Один из методов детектирования частиц основан на регистрации т.н. ионизационных потерь энергии частицы. Проходя через вещество, заряженные частицы испытывают кулоновское взаимодействие с электронами и передают им часть энергии на их возбуждение и ионизацию. В особых веществах – сцинтилляторах – ионизационные потери преобразуются в оптическое излучение. Возникший поток фотонов собирается специальным образом и преобразуется в электрический сигнал.

Регистрация световых импульсов слабой интенсивности является одним из важнейших вопросов экспериментальной физики. Кремниевый фотодиод (SiPM) является весьма перспективным новым фотоприемником и вполне может прийти на смену большим ФЭУ.

Преимущества:

- Компактность
- Низкое рабочее напряжение импульсов
- Высокая эффективность
- Высокое амплитудное разрешение
- Достаточно высокое временное разрешение
- Низкая чувствительность к

Недостатки:

- Высокий уровень шумовых
- Существенная температурная зависимость коэффициента усиления и шумов
- Необходимость усиления сигнала

МАГНИТНЫМ ПОЛЯМ

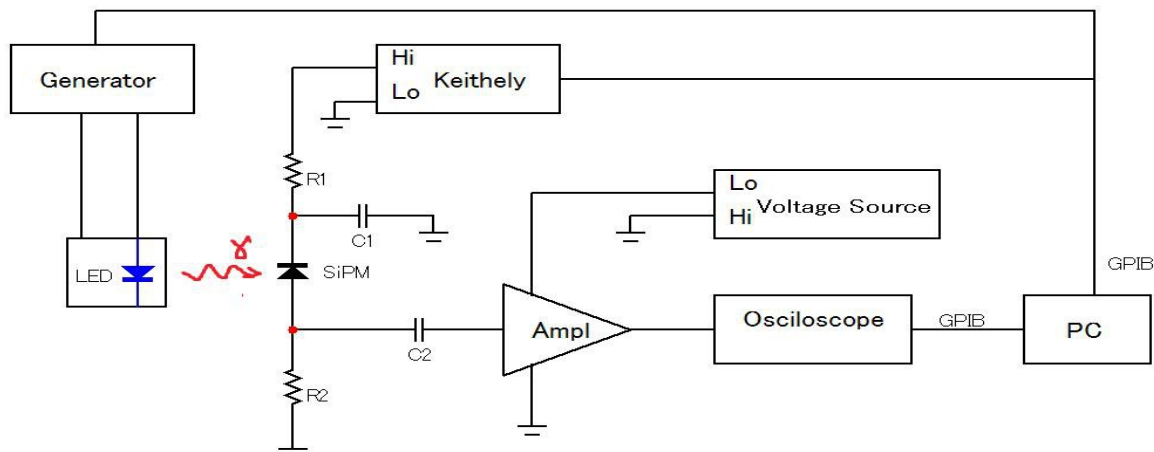


Рисунок 1: схема установки

Характеристика СРТА 151-30

| Свойства: | Применение: |
|--|--|
| • Высокое усиление | • Фотометрия |
| • малые шумы | • Детектор малых сигналов видимого диапазона спектра светового излучения |
| • оптимизация в зелено-красном диапазоне спектра светового излучения | |

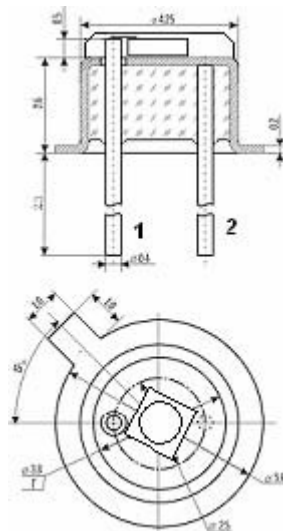
Исполнение:

| Параметр | Значение | Ед. изм |
|-------------------------------------|----------|---------|
| Диаметр фоточувствительной площадки | 1,28 | мм |
| Корпус | ТО-18 | |
| Количество ячеек | 796 | |

Условия эксплуатации и хранения:

| Параметр | Символ | Значение | Ед. изм |
|------------------------|---------|--------------|---------|
| Температура применения | T раб. | от -20 до 40 | °C |
| Температура хранения | T хран. | от -40 до 80 | °C |

Конструкция фотодиода



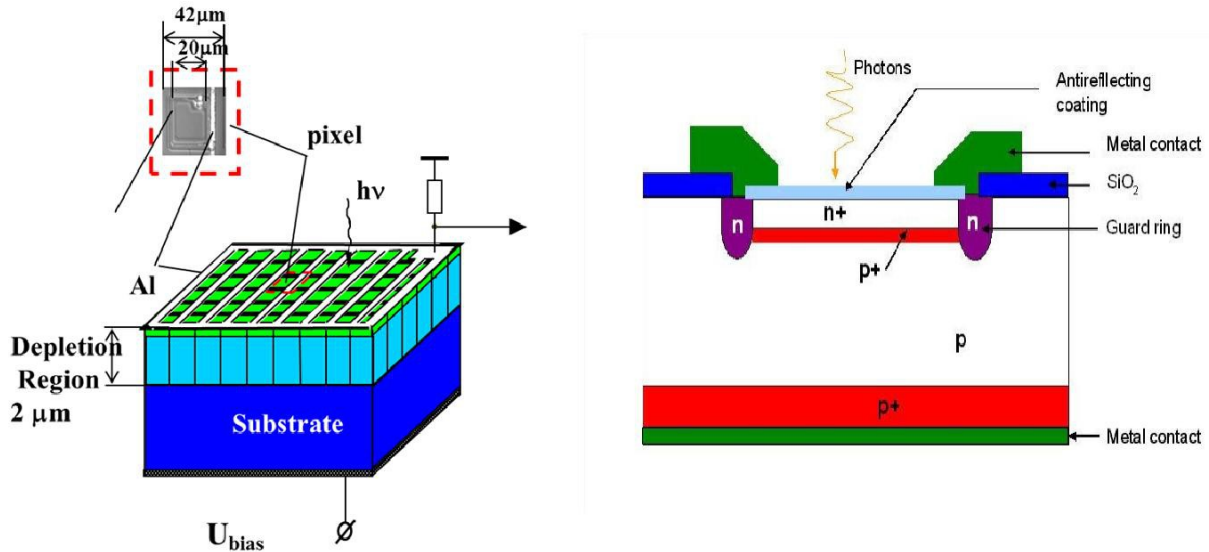


Рисунок 2: схема SiPM

2. Постановка задачи

Главная цель нашей работы заключалась в нахождение зависимостей между импульсными, вольт-амперными и шумовыми характеристиками лавинных фотодиодов. С последующей разделением их на группы, систематизацией и проведения качественного анализа на пригодность тех или иных SiPM для использования их в экспериментах, проводимых на базе ИФВЭ.

По предпосылкам, оставленными нам предшественниками, мы решили исследовать зависимость импульсных характеристик от вида обратной ВАХ.

Кроме того, мы провели дополнительные измерения, связанные с прямой ВАХ, а так же определение сопротивления и ёмкости.

3. Проведённые исследования

Изначально все фотодиоды были распределены по виду обратной вольт-амперной характеристики, где по оси X откладывается напряжение в вольтах, а по оси Y логарифмическая производная тока (I'/I): нормальная ВАХ, нормальная ВАХ с промежуточным пиком и ВАХ с слабо выраженным переходом на плато.

Априорно предполагалось, что SiPM с нормальной ВАХ являются

«хорошими».

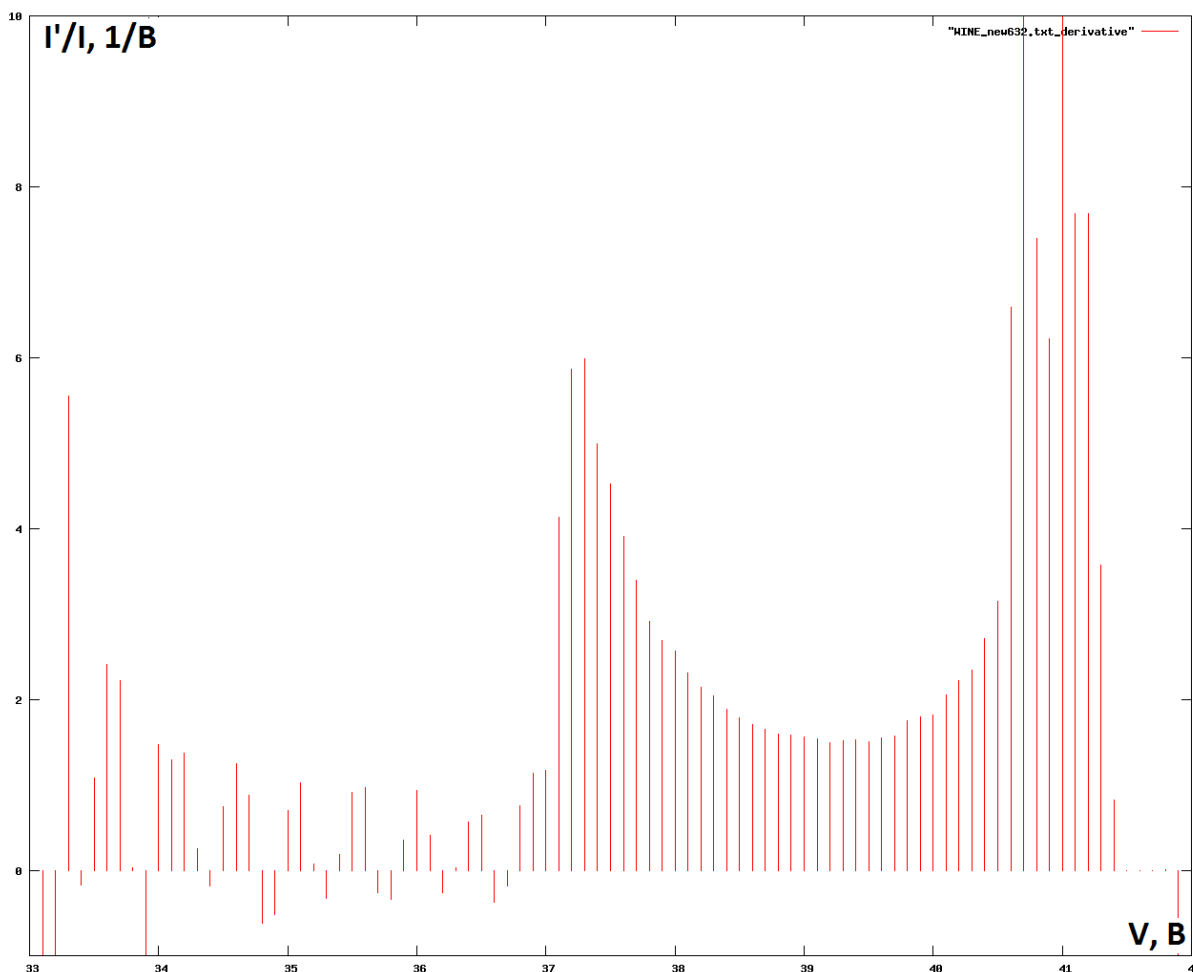


Рисунок 3: Обратная VAX SiPM №632 с логарифмической производной. Нормальный тип.

а) Были подозрения о пригодности для использования SiPM с промежуточным пиком. В результате сбора статистики с №618 («сомнительный») и с №632 («хороший»), которые принадлежат одной партии и обладают одинаковым breakdown-voltage, мы обнаружили, что промежуточный пик не вносит искажений в измерения в заданном диапазоне напряжений. Что позволяет утверждать, что и остальные фотодиоды с промежуточным пиком, которые составляют 18% от общего числа, являются «хорошими».

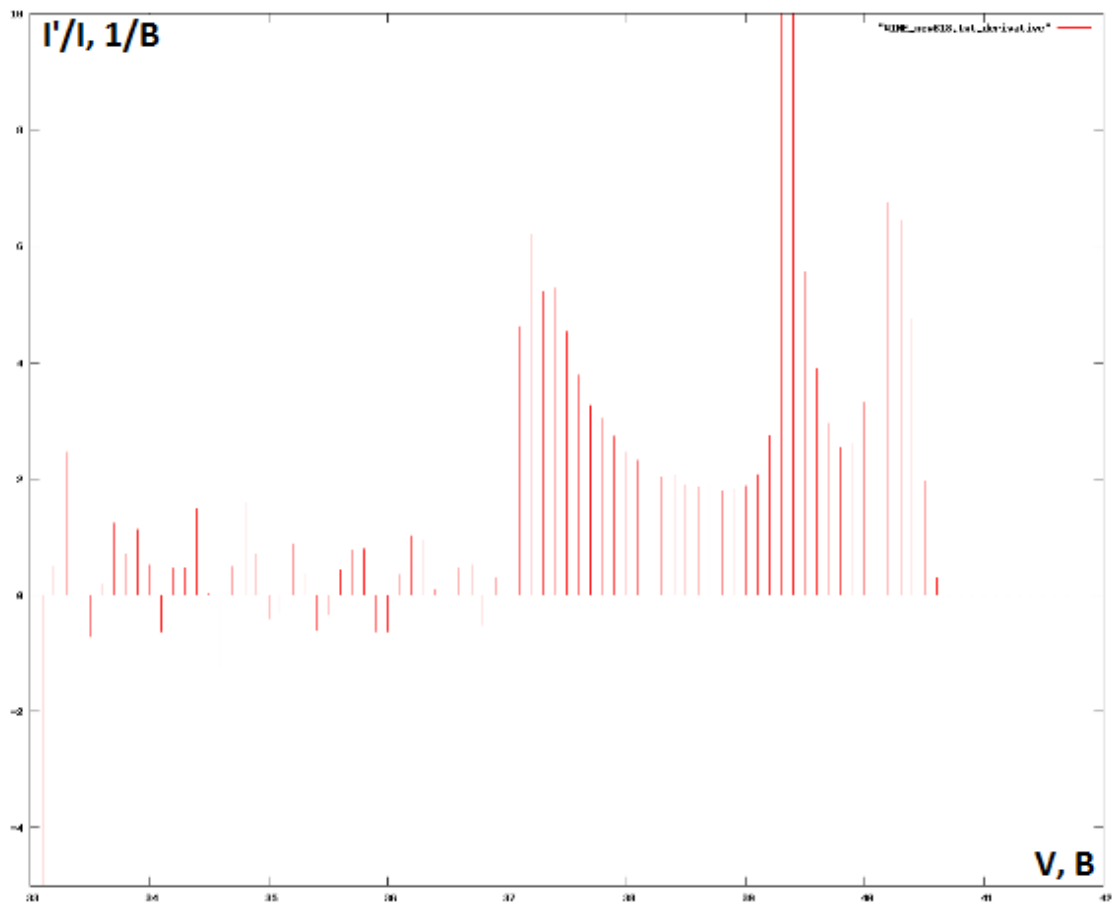
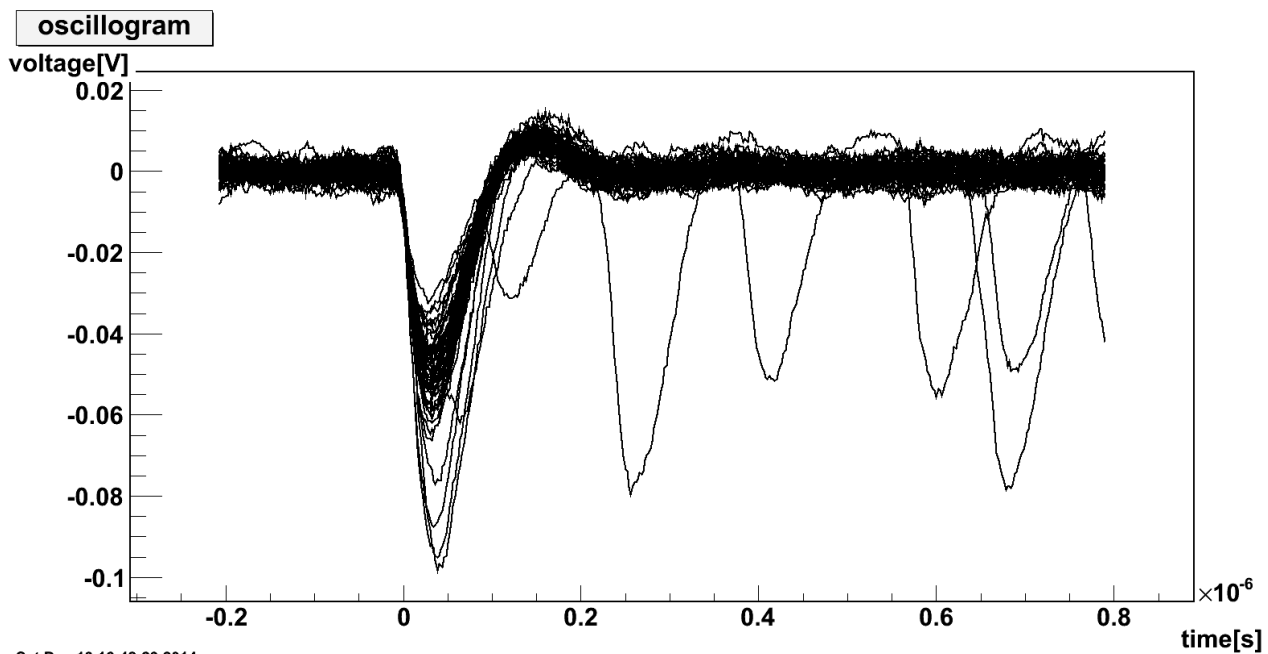
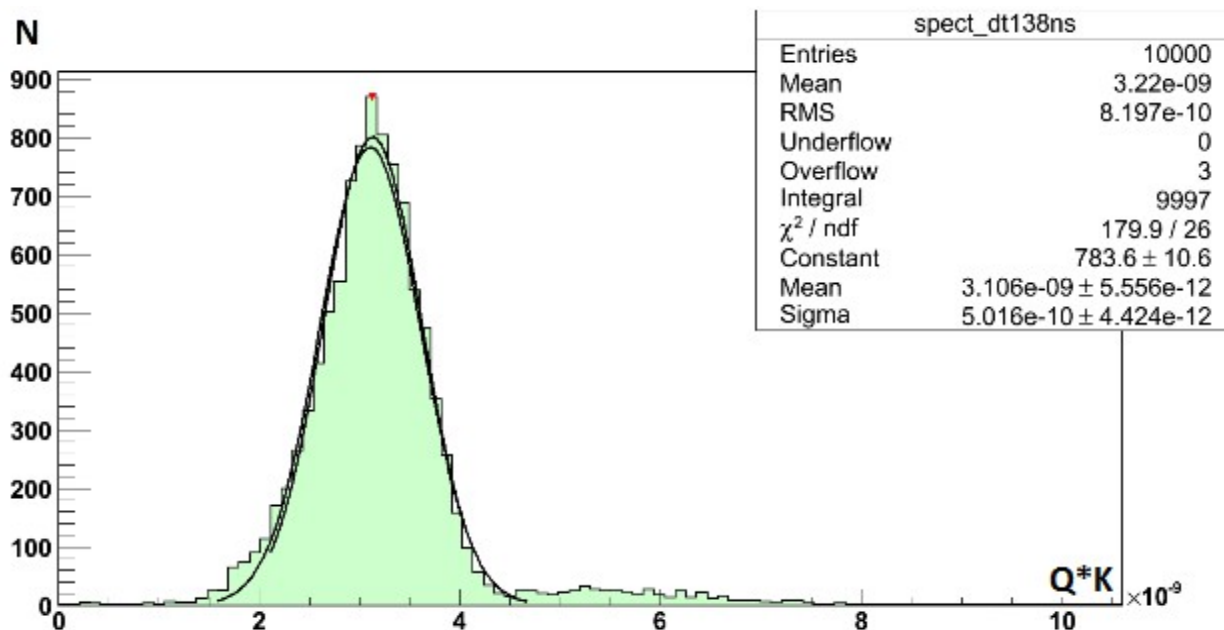


Рисунок 4: Обратная ВАХ SiPM №618 с логарифмической производной. Промежуточный пик.



Sat Dec 13 16:42:29 2014

Рисунок 5: Осциллограммы для №618



Sat Dec 13 17:08:45 2014

Рисунок 6: распределение срабатываний по заряду

Пояснение к последнему графику: на данной картинке показано распределение по N от величины, пропорциональной заряду ($Q \cdot K$). В идеале, для одноэлектронного срабатывания мы должны иметь один пик на характерном заряде, однако, в виду естественных причин, все ячейки имеют отклонение от средних характеристик, поэтому получается гауссова кривая. То, что не входит в гаусс, является повторными срабатываниями (по разным причинам: шумы, cross-talk, послеимпульсы).

б) Вторыми кандидатами на проверку являлись фотодиоды с плохо выраженным плато, которые составляют 12% от партии. Были промерены импульсные и шумовые характеристики для №808 и №818.

Полученные результаты, говорят о большом уровне шумов, слабом усилении исходного сигнала, что делает их непригодными для использования в детекторе частиц.

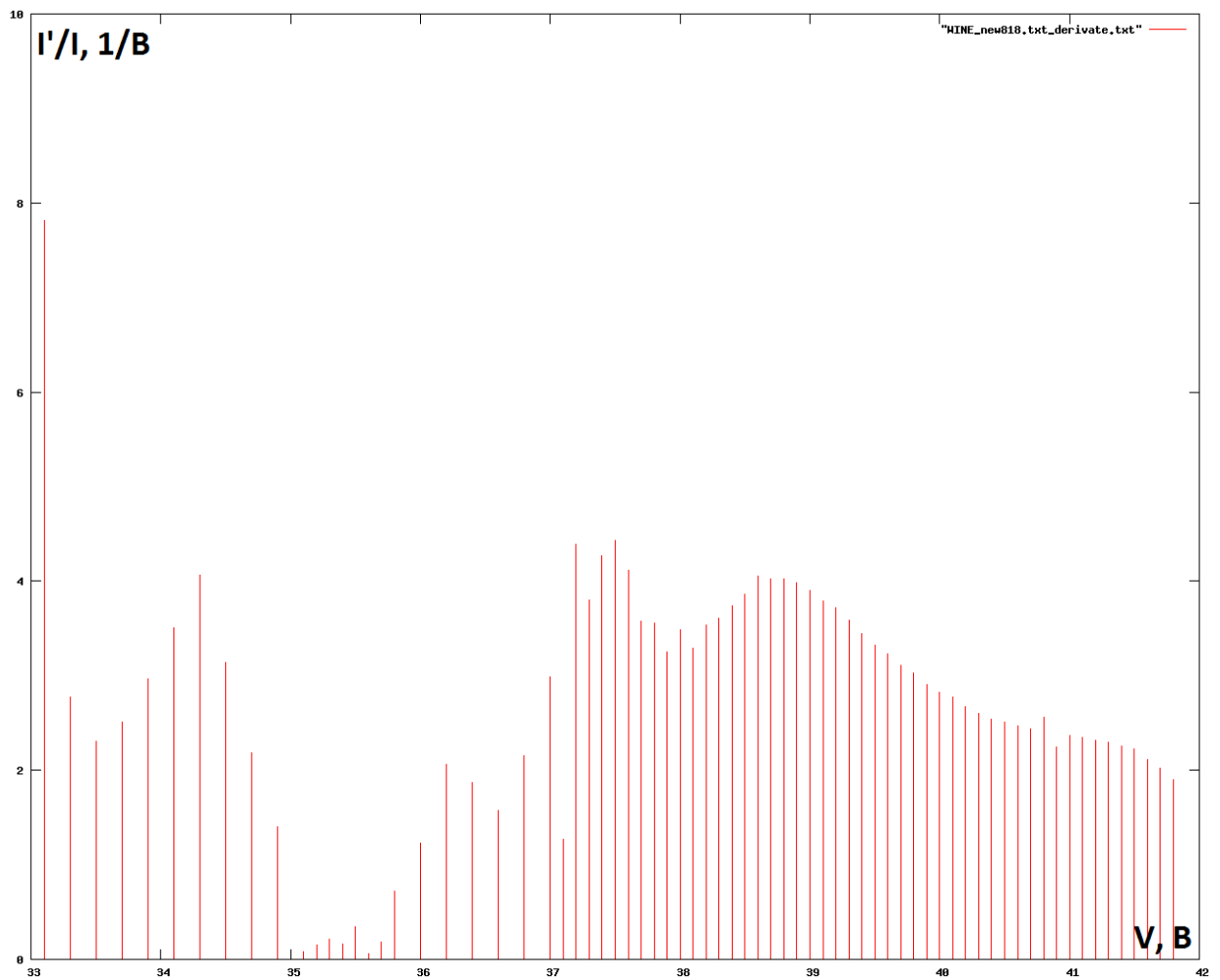
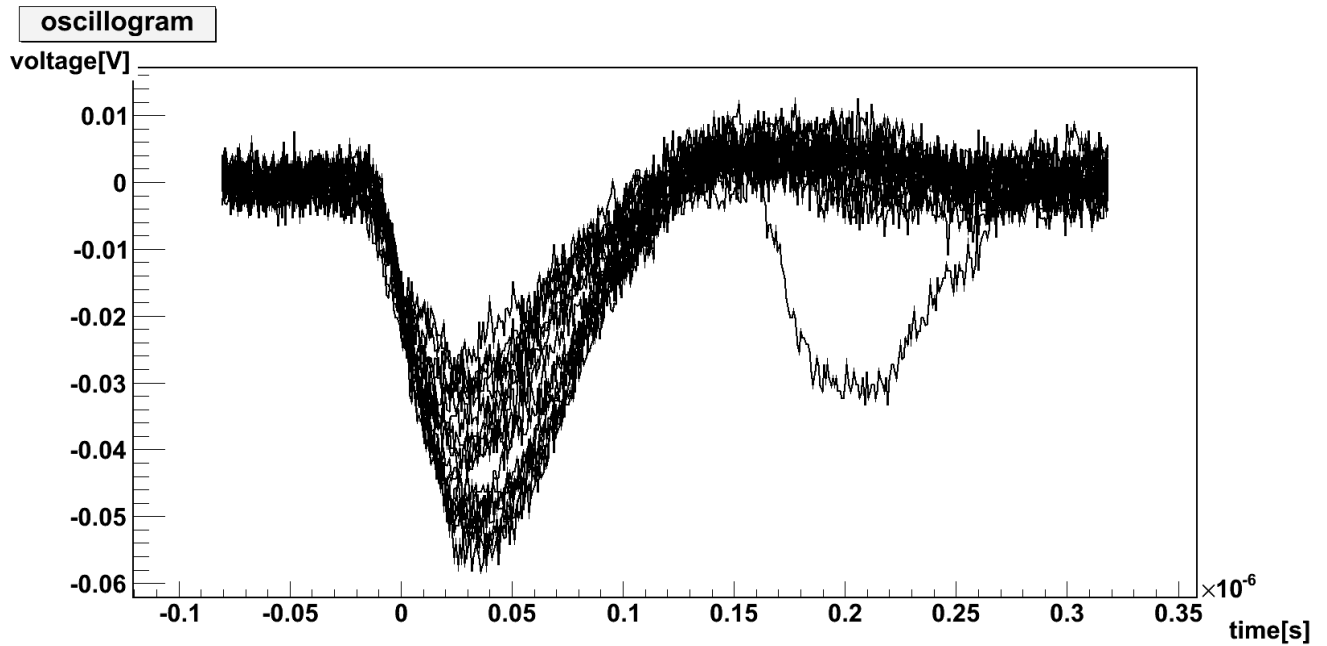
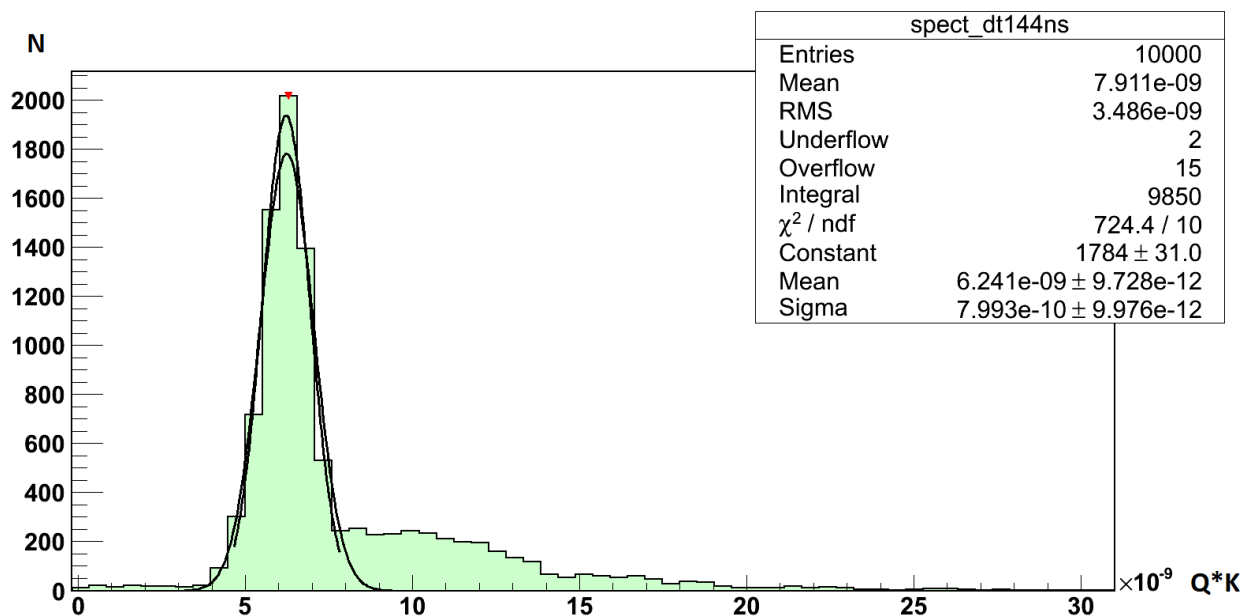


Рисунок 7: Обратная ВАХ SiPM №818 с логарифмической производной.
Слабовыраженный выход на плато.



Sat Dec 13 16:46:37 2014

Рисунок 8: Осциллограммы для №818



Sat Dec 13 17:09:59 2014

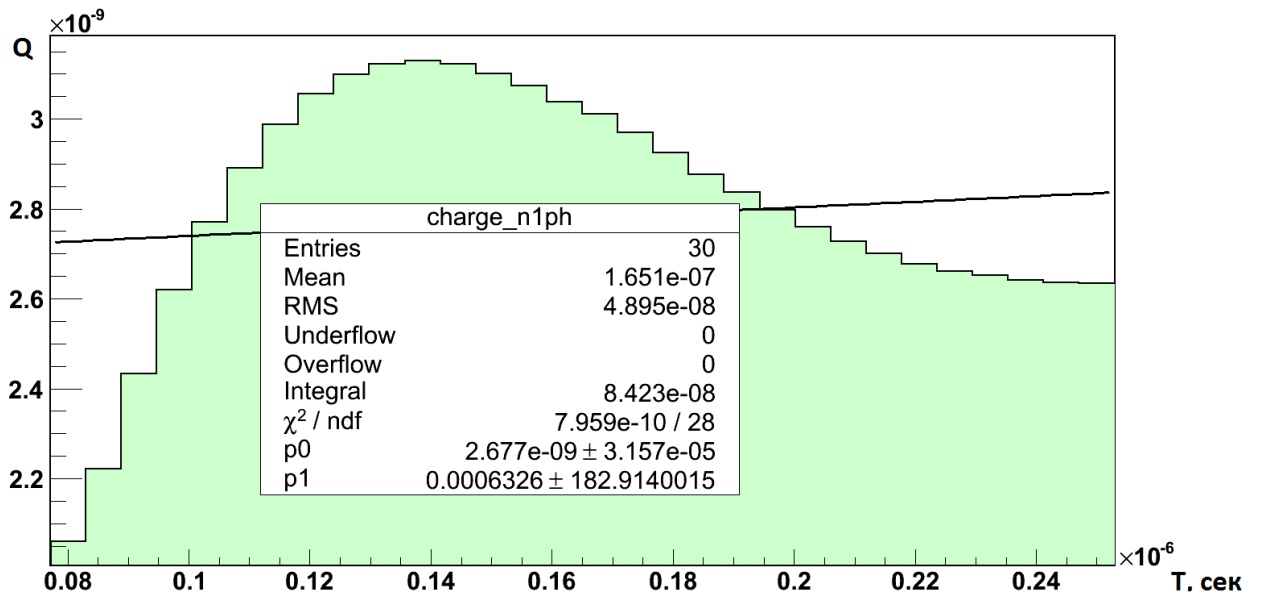
Рисунок 9: распределение срабатываний по заряду для 818. Явно виден "наплыв" на гауссе справа

с) Были проведены исследования для обоснования теоретического предположения, в рамках модели, описывающей срабатывание ячейки, как разряд конденсатора до пробивного напряжения, $Q(V) = K \cdot (V - V_0) \cdot C$, где K – коэффициент усиления, C – ёмкость отдельной ячейки. Полученная экспериментально зависимость хорошо описывается данной формулой.

Это даёт возможность для измерения средней по фотодиоду ёмкости ячейки и альтернативный способ определения breakdown-voltage (V_0), которую ранее определяли по ВАХ и по уровню шумов (см. Таблицу 1).

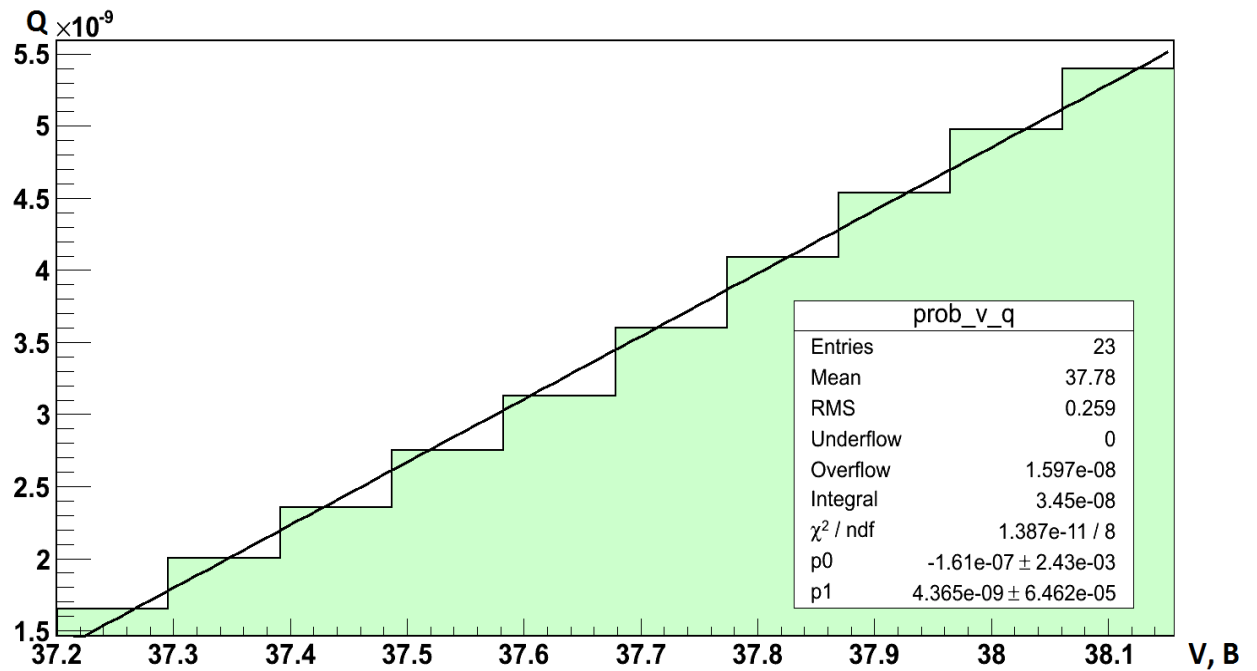
На первой картинке, вы видите график зависимости заряда от окна интегрирования по осциллограмме.

На этом графике нас интересует максимальное значение, которое является условным зарядом (с некоторым коэффициентом), приходящимся на одноэлектронный отклик при определённом напряжении. Далее, по этим данным строится график зависимости Q от V , из которого и определяются $K \cdot C$ (угол наклона) и V_0 .



Sat Dec 13 17:17:36 2014

Рисунок 10: зависимость заряда от времени интегрирования.



Wed Dec 17 10:48:13 2014

Рисунок 11: зависимость 1e-заряда от напряжения

| № | V_0 , В | V_0 , В | V_0 , В |
|-----|-----------|-----------|-----------|
| 618 | 36.9 | 37.2 | 37.2 |
| 622 | 35.1 | 35.6 | 35.7 |
| 632 | 36.1 | 37.3 | 37.4 |
| 637 | 36.5 | 37.1 | 37 |
| 704 | 35.1 | 36.4 | 36.2 |
| 808 | 34.3 | 35.2 | 35.1 |
| 818 | 36.7 | 37.5 | 37.9 |

Таблица 1: *breakdown-voltage* (V_0), определённый для различных SiPM следующими методами: по графику $Q(V)$; по обратной ВАХ; по шумовой характеристике (от предшественников).

| № | $K \cdot C$, 10^{-9} |
|-----|-------------------------|
| 618 | 4.365 |
| 622 | 4.123 |
| 632 | 3.162 |
| 637 | 3.917 |
| 704 | 3.228 |
| 808 | 2.16 |
| 818 | 4,18 |

Таблица 2: средняя ёмкость отдельной ячейки SiPM в условных единицах, пропорциональных, с некоторой размерной константой, ёмкости

d) Определение «хорошести»/«плохости» по импульсной характеристики достаточно время затратно, поэтому мы пытались связать их с более простыми для измерения величинами, как ёмкость и сопротивление.

Как видно из вышеприведённой таблицы, ёмкость не коррелирует с «качеством» SiPM. Поэтому мы решили провести измерение сопротивлений фотодиодов по прямой ВАХ. Измерение проводилось по линейной экстраполяции при полностью открытом фотодиоде, т. е. по конечному участку графика. Полученное сопротивление является сопротивлением параллельно подключённых ячеек. В Таблице 3 указано уже пересчитанное на одну ячейку сопротивление.

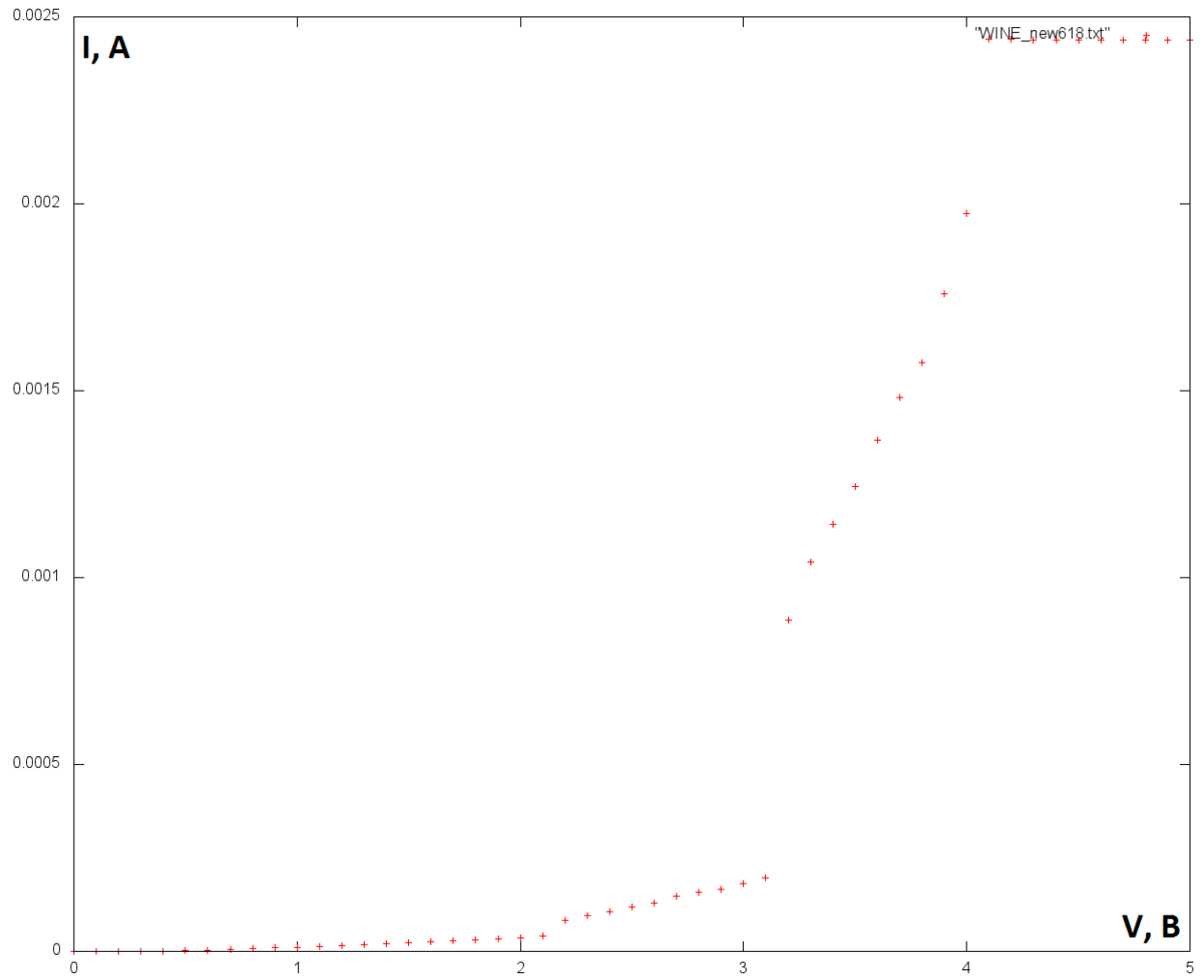


Рисунок 12: прямая ВАХ SiPM №632.

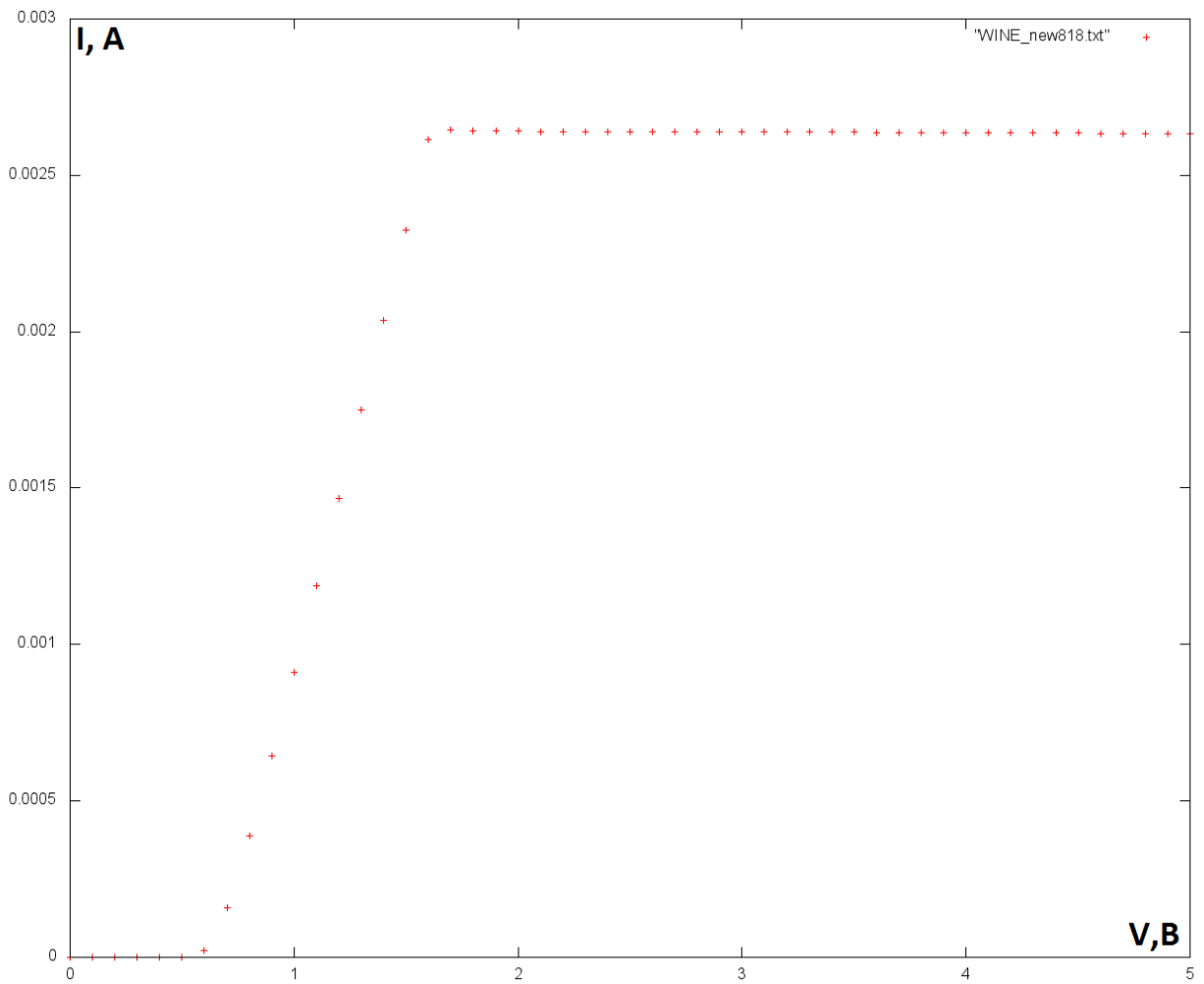


Рисунок 13: прямая ВАХ SiPM №818

| № | R, кОм |
|-----|--------|
| 618 | 235 |
| 622 | 497 |
| 632 | 215 |
| 637 | 390 |
| 704 | 346 |
| 808 | 612 |
| 818 | 284 |

Таблица 3: сопротивление ячейки фотодиода, рассчитанные по формуле $796/K$, где K -- угол наклона графиков $[V/A]$, 796 -- количество ячеек.

Первоначальное предположение, о том, что низкие сопротивления указывают на «качество» SiPM, упиралось в несоответствие сопротивления 622, которые по виду обратной ВАХ был причислен к «хорошим». Однако, ввиду аппаратного ограничения измеряемых токов, данные числа есть верхние границы возможного сопротивления. Поэтому вопрос о корреляции сопротивления с импульсными характеристиками остаётся открытым.

5. Вывод

Во время работы были исследованы различные SiPM на связь вольт-амперной и импульсной характеристик. Выявлено, что SiPM с нормальной ВАХ и с промежуточным пиком пригодны для использования в детекторе, в то время как фотодиоды с плохо выраженным плато не подходят.

Были оценены сопротивления и ёмкость, остаётся открытым вопрос об их связи с импульсными и шумовыми характеристиками SiPM.